



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

---

**Facultad de Ciencias**

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TRABAJO FIN DE GRADO

**Arcillas sensitivas y su detección en Gotemburgo**

Presentado por:

**D. Alberto Del Castillo Hernández**

Tutor:

**Prof. D. Francisco Javier Martínez Garzón y D<sup>a</sup>. Ana Romero Freire**

Curso académico 2021/2022



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

Grado en “Ciencias Ambientales” de la Universidad de Granada

## Índice

1.1 Descripción de la modalidad del TFG, antecedentes bibliográficos y justificación del estudio.....	5
1.2 La arcilla .....	5
1.2.1 Composición y estructura de la arcilla.....	5
1.2.2 Propiedades de la arcilla .....	6
1.3 Que son las arcillas sensitivas .....	6
1.3.1 Como se forman las arcillas sensitivas .....	7
1.3.2 Detección .....	8
1.3.3 Distribución mapa geológico.....	9
1.3.4 Movimientos de ladera.....	9
2. OBJETIVOS .....	10
3. METODOLOGÍA.....	10
4. RESULTADOS.....	11
5. CONCLUSIONES .....	20
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	20

Resumen: Las arcillas sensitivas o “quick clays” son un tipo de arcillas, de origen glaciomarino usualmente, las cuales se caracterizan por tener una sensibilidad muy alta, lo que significa, que pierden su estructura y se comportan como un fluido ante una perturbación del medio. Esta pérdida de estructura se debe a consecuencia de una lixiviación de sales contenidas en la arcilla. La principal consecuencia que provoca la presencia de estas arcillas son los movimientos de laderas, por lo que es de gran importancia conocer y predecir su distribución, especialmente al edificar en un lugar. Estas arcillas son comunes en las latitudes altas del hemisferio norte, donde la presencia de glaciares dejó las condiciones ideales para su formación. El amplio contenido en arcillas de los suelos de la ciudad de Gotemburgo, así como su localización geográfica, hace que sea una zona susceptible de presentar este tipo de arcillas

El objetivo principal de este trabajo es el de predecir la presencia de arcillas sensitivas en las áreas circundantes a la ciudad de Gotemburgo realizando una revisión bibliográfica de este tipo de arcillas y analizando la composición del suelo de las áreas susceptibles mediante el estudio de mapas geológicos disponibles.

Tras analizar los resultados, se concluye que es muy difícil predecir su distribución y requiere del análisis del suelo de la zona, sin embargo, se puede estimar las áreas con más probabilidad de contener estas arcillas mediante el estudio de los mapas geológicos.

Palabras clave: Arcillas sensitivas, Quick clays, Gotemburgo, Sensibilidad y Landslide

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

### 1.1 Descripción de la modalidad del TFG, antecedentes bibliográficos y justificación del estudio.

Este trabajo bibliográfico pretende reunir información sobre las “quick clays” o también conocidas en español como “arcillas sensibles” o “arcillas sensitivas” mediante la búsqueda de otros documentos, artículos, mapas y trabajos existentes y sintetizarlos en un solo documento en castellano, centrándose en su distribución en Gotemburgo, Suecia, para así poder analizar su posible localización, así como los problemas que pueden causar su presencia.

Este tipo de arcillas suelen ser frecuentes en regiones con latitudes altas, donde la presencia de glaciares ha sido superior en el pasado y ha dejado las condiciones y materiales adecuados para que se dé lugar a estas peligrosas arcillas.

Como se describe más adelante, las arcillas están altamente relacionadas con procesos como los movimientos de ladera y su presencia puede suponer un peligro para la vida de las personas que vivan en la zona y para las estructuras edificadas sobre la misma, por lo que es de gran importancia conocer su distribución, especialmente, a la hora de construir en un lugar. Sin embargo, su detección requiere de la toma de muestras en el área que se quiere estudiar y su posterior análisis, ya que es muy difícil predecir su localización.

Es de destacar como antecedentes a este estudio: la tesis doctoral “Predicting Spatial and Stratigraphic Quick-clay Distribution in SW Sweden” realizada por Martin Persson.

### 1.2 La arcilla

Para comprender cómo y bajo qué procesos la arcilla se puede transformar en quick clays, es necesario conocer primero qué es la arcilla y cuáles son sus características principales.

La arcilla es la fracción geológica con un tamaño de grano inferior a 2 micras, compuesta por diferentes tipos de minerales entre los que abundan los filosilicatos (Besoain, 1985). Este tipo de mineral tiene estructura laminar, es decir, mucho más alargada y ancha que gruesa, lo que le confiere una gran superficie en relación con la masa y permitiendo así propiedades como la adsorción, característica de materiales con grano fino y que es de gran relevancia para la formación de “quick clays”. Esta adsorción es la responsable de que las arcillas tengan una buena capacidad de reserva de agua en su interior.

En lo relativo a la formación de arcillas, la gran mayoría de ellas se forman por procesos de meteorización y otros procesos fisicoquímicos. La roca meteorizada y la posterior erosión y sedimentación determinarán el tipo de arcilla que se forma (Velde, 1992; Cruden, 1996).

#### 1.2.1 Composición y estructura de la arcilla

La arcilla está compuesta principalmente por silicatos, minerales característicos de las arcillas, los cuales forman el esqueleto representando a la fracción sólida. Los espacios entre estas partículas se llenan por líquidos, gases o una mezcla de ambos (Rankka, et al., 2004).

Su estructura se caracteriza por consistir en un apilamiento de láminas tetraédricas y octaédricas, permitiendo la absorción y retención de otros iones y agua procedentes del medio entre las diferentes capas (García Romero, 2002).

### 1.2.2 *Propiedades de la arcilla*

Las propiedades que hacen a las arcillas especiales frente al resto de materiales vienen dadas principalmente por su peculiar estructura. Una de las propiedades más importantes de las arcillas y también la más relevante para este estudio es su capacidad para absorber el agua y otros iones en su estructura (Chávez García, 2022). La capacidad para adsorber y retener el agua entre las partículas de la arcilla provoca que estas se hinchen almacenando el agua en su interior y les permite a las arcillas mantenerse suspendidas en el agua, lo que hace que sean muy fácilmente transportables por este medio.

Esta propiedad junto con la capacidad de intercambiar y absorber otros iones presentes en el medio es la responsable, si se dan las condiciones adecuadas, de la posterior formación de las “quick clays” (Velde, 1992).

### 1.3 *Que son las arcillas sensitivas*

Las “quick clays” se definen como un tipo de arcillas altamente sensibles e inestables que, cuando son perturbadas mediante vibraciones, compresiones u otro tipo de fuerzas externas provocan que su estructura colapse ya que, las partículas que la componen, proceden a reordenarse alineándose paralelamente, produciendo un cambio en su textura y, por lo tanto, reduciendo drásticamente su resistencia al corte, comportándose de este modo como un fluido. El origen de su inestabilidad estructural se debe a una lixiviación de sales que la arcilla había incorporado en su estructura, dejando así a los minerales de arcilla en posiciones vulnerables ante perturbaciones (Persson, 2014). Este colapso provocado por la perturbación se produce cuando el factor de la sensibilidad supera una cifra concreta de 50 y cuando su resistencia al corte es de menos de 0,4 kPa. A partir de estas cifras, la arcilla pasa de llamarse altamente sensitiva a “quick clay” (Osterman, 1963; Karlsson, 1989).

La sensibilidad, es el parámetro que define la resistencia al corte de la arcilla, siendo este la relación entre la resistencia al corte de la muestra de arcilla inalterada y sin drenar y su resistencia cuando es perturbada. De acuerdo a esta relación las arcillas se pueden clasificar en 4 grupos según su sensibilidad tal y como aparece en la Tabla 1:

Tabla 1. Clasificación de las arcillas según su sensibilidad (St) (Clasificación Sueca 2004):

<b>Designación</b>	<b>valor</b>
Ligeramente sensitiva	<8
Medianamente sensitiva	8-30
Altamente sensitiva	30-50
Quick clays *	>50

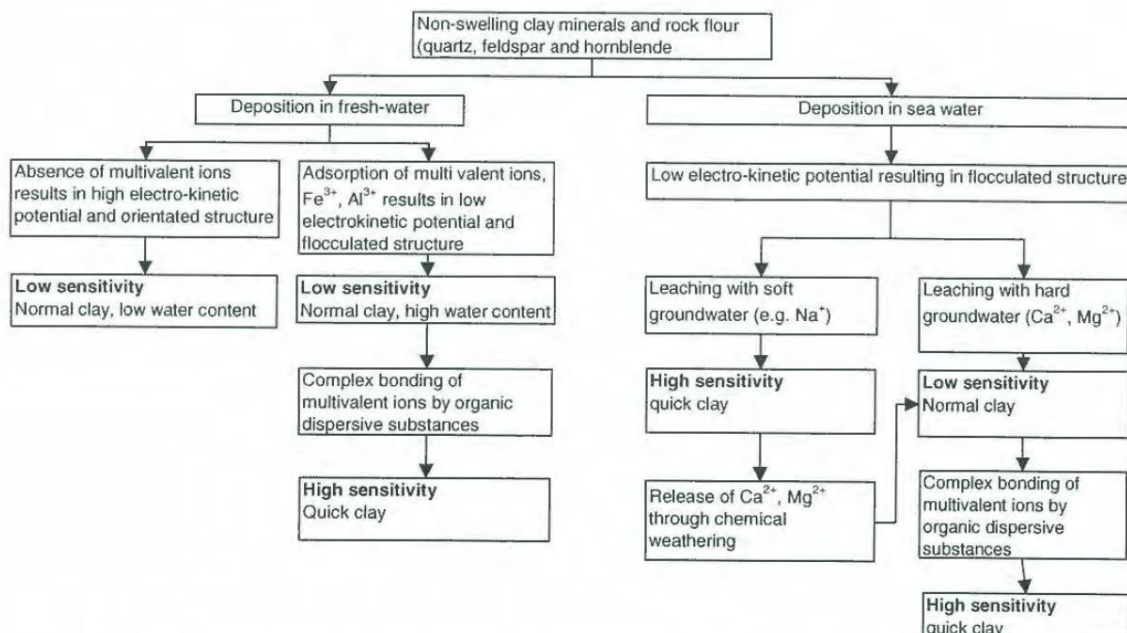
\*Para considerarse Quick clay debe además tener una resistencia al corte de menos de 0,4 kPa (Abuhajar et. al., 2010; Persson, 2014).

Existen principalmente dos tipos de arcillas sensitivas, las cuales difieren en la energía mecánica que hay que aplicar para modificar su estructura y que se comporten como un fluido. Estas son conocidas como “rapid quick clays” o “slow quick clays” dependiendo de la velocidad a la que se transforman en liquido cuando se les aplica una fuerza (Söderblom, 1974). A su vez, las arcillas sedimentadas se pueden dividir en aquellas depositadas en agua dulce y las depositadas en salada, lo cual influirá en las propiedades de la arcilla y en la posterior formación de la arcilla sensitiva (Deméneghi, 2010).

Este tipo de arcillas suelen ser más predominantes en las latitudes altas del hemisferio norte, en regiones tales como Noruega, Suecia, Finlandia, Alaska, Canadá y Rusia. (Salas Romero, 2019). Esto se debe a que, las arcillas sensitivas, se forman a partir de sedimentos arcillosos que una vez fueron depositados en ambientes marinos o de agua dulce (Osterman, 1963). Sin embargo, la gran mayoría de “quick clays” formadas en los países escandinavos lo hicieron a partir de sedimentos depositados por los glaciares en un ambiente marino. Las arcillas de Suecia proceden concretamente de sedimentos depositados en ambientes marinos durante el final de la glaciación de Fennoscandia que abarca desde hace 14,000 años hasta hace 10,000 años (Stroeven et al., 2016; Salas Romero, et al., 2016).

### 1.3.1 Como se forman las arcillas sensitivas

Para la formación de “quick clays” es necesario que un grupo de arcillas sean depositadas en un ambiente marino o dulce con abundante materia orgánica presente en el entorno de la que pueda extraer iones e incorporararlos en su estructura. Una vez formado el estrato de arcilla sensitiva, este va siendo enterrado por otros sedimentos y estratos cuyo peso provocan que esta arcilla se asiente por consolidación, generalmente de pequeña magnitud. (Deméneghi, 2010).



**Figura 1:** Esquema con los principios de formación de Quick clays (Rankka, et al., 2004). (Brenner et al. in Brand & Brenner, 1981)

Las arcillas depositadas en agua dulce o salobre se pueden convertir en arcillas sensitivas si se mantienen en contacto y absorben los iones de suelos ricos en humus, turba u otros tipos de sustancias orgánicas, en lugar de incorporar los iones de las sales del mar (Rankka, et al., 2004). Suelen ser frecuentes los hallazgos de quick clays cerca de estos depósitos húmicos y suelos con alto contenido en materia orgánica (Osterman, 1963).

Las partículas de las arcillas en un ambiente marino, el cual es en el que se han desarrollado la mayoría de arcillas sensitivas suecas, se ordenarán de una forma mucho más caótica, debido a la polarización de las partículas, que las de agua dulce, las cuales presentarán una estructura más compacta (David Peter Giles, 2020).

La principal razón del colapso de la estructura de este tipo de arcillas se debe a que, cuando esta arcilla “salada” se ve expuesta a un proceso de lixiviación, las sales que la arcilla incorporó en el interior de su estructura son retiradas, dejando los minerales en posiciones vulnerables y convirtiendo la arcilla en un material mucho más sensible e inestable (N. E. SIMONS, 1959).

### 1.3.2 Detección

Hay una gran cantidad de métodos para calcular la sensibilidad de un suelo, ya bien sea *in situ* o en el laboratorio, mediante el uso de diferentes dispositivos diseñados para medir su resistencia al cizallamiento y sus correspondientes fórmulas. Algunos de los métodos más utilizados son:

#### Test de veleta de campo (FVT) (*in situ*)

En este ensayo se emplea un artefacto conocido como veleta que consiste en cuatro paletas metálicas dispuestas formando ángulos rectos entre sí, que serán introducidas en el suelo hasta alcanzar la profundidad en la que se desea realizar el ensayo, tras esto se hará girar el dispositivo en torno al eje vertical para medir así la resistencia al corte del suelo. (Herrera Abello & Niño Torres, 2015)

#### Ensayo de compresión simple o no confinada (UCT) (Laboratorio)

Este método permite calcular la sensibilidad del suelo comparando la resistencia entre la muestra de suelo inalterada y la muestra remoldeada. Consiste en aplicar presión a la muestra lentamente desde un plano vertical y atender a su deformación y carga aplicada. (Chumpitaz Hernández, 2015)

#### Test de veleta de laboratorio (LVT) (Laboratorio)

Este ensayo sigue los mismos principios que el test de veleta de campo. Esta vez, la veleta es introducida en la muestra, la cual está contenida en un tubo y se hace girar la veleta (Abuhajar et. al, 2010).

#### Prueba de caída de cono (FCT) (Laboratorio)

Este método es muy sencillo y rápido y consiste en sostener un cono metálico con una masa y dimensiones concretas de tal forma que solo la punta esté en contacto con el suelo. Tras esto, se deja caer el cono que, por su propio peso, se hunde en la tierra. La distancia penetrada por el cono servirá para calcular la resistencia al cizallamiento de ese suelo (Clemente et. al, 2019).



### Ensayo de penetración de cono (CPT) (*in situ*)

Este ensayo es uno de los más utilizados y consiste en empujar el cono, sin rotación, varios metros bajo la superficie a una velocidad controlada (usualmente 20 mm/s) y medir la resistencia del cono, la fricción generada y la presión del agua del poro empleando largas varas metálicas (Löfroth, et al., 2012).

Los métodos más usados en Suecia para detectar las arcillas sensitivas son el CPT y FCT tomando muestras inalteradas y realizando ensayos de caída de cono en la arcilla en sus estados inalterados y perturbados (Andersson-Sköld, 2005).

#### 1.3.3 Distribución mapa geológico

El mapeo de arcillas sensitivas en Suecia es un proceso muy costoso, ya que, como se ha mencionado con anterioridad, no se puede predecir su localización con certeza y la única forma de conocer su extensión es mediante la toma de muestras y su posterior análisis zona por zona. Por esta razón, y teniendo en cuenta el coste económico de estos muestreos, no es rentable el desarrollo de un mapa detallado con todas las formaciones de quick clays, sino que se seleccionan algunos puntos específicos en los que se realiza un estudio (Andersson-Sköld, 2005). Tras 70 años de estudio de las arcillas sensitivas y su desarrollo no se ha conseguido llevar a cabo un modelo que ayude a predecir su posición, tan solo unos pocos estudios se han realizado para calcular la probabilidad de deslizamientos de tierras en algunos lugares de los países escandinavos y Canadá que presentaban este tipo de arcillas, como los realizados por Erener et al., 2007; LESSLOSS, 2007; y Quinn, 2008, 2009, 2010, 2011 (Persson, 2014).

Para estudiar la posible localización de las arcillas sensitivas de origen glaciomarino, no solo es importante analizar los mapas actuales para buscar la distribución de materiales específicos, sino que también es necesario atender a la posición de los límites de los glaciares de la última glaciación de Fenoscandia, hace 10 mil años, la cual abarcaba la península escandinava, la península de Kola y Finlandia. En estos límites es donde se encuentran las acumulaciones de sedimentos que los glaciares depositaron en lo que, en aquel momento, era mar. Tras la retirada de los glaciares y gracias al movimiento isostático de la corteza terrestre, que provocó el lento pero constante ascenso de la península escandinava sobre el nivel del mar, junto con la subida del propio nivel del mar por el deshielo, se sucedieron una serie de regresiones y transgresiones marítimas hasta dejar estos sedimentos por encima de la superficie (Salas Romero, et al., 2016).

#### 1.3.4 Movimientos de ladera

Una de las principales consecuencias que acarrea la presencia de arcillas sensitivas en un lugar son los movimientos de ladera asociados a la pérdida de su estructura y repentino comportamiento fluido. Estos son un tipo de fenómeno natural que no suelen suceder con frecuencia, pero cuando lo hacen, pueden conllevar graves consecuencias. El último deslizamiento de tierra, provocado por estas arcillas, que dejó fatales consecuencias fue el de Gjerdrum, Noruega, a finales de 2020, acabando con la vida de 10 personas.

El río Göta, que atraviesa la ciudad de Gotemburgo, es muy propenso a sufrir movimientos de ladera en las zonas cercanas a su cauce, por lo que, desde que se comenzaron a estudiar las arcillas sensitivas, ha sido una de las zonas más examinadas de Suecia (Osterman, 1963).

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este estudio es el de sintetizar y describir el máximo de información posible obtenida a partir de otros estudios anteriores que tratan sobre las arcillas sensitivas y analizar la composición del suelo en las zonas circundantes a la ciudad de Gotemburgo mediante el estudio de mapas geológicos disponibles, principalmente obtenidos de la página web del Servicio Geológico Sueco Geokartan, para intentar así intentar predecir su presencia en el área estudiada.

Como objetivos específicos se priorizó la búsqueda de información sobre las arcillas sensitivas y su formación, así como de los minerales de las arcillas y sus propiedades. Después se procedió a realizar un estudio sobre los deslizamientos de tierras más relevantes provocados por estas arcillas, especialmente en el río Göta. Finalmente, se buscaron recursos para obtener los mapas necesarios para realizar un análisis de la zona a estudiar.

## **3. METODOLOGÍA**

El proyecto se dividió en las siguientes partes:

1. Reunir el máximo de información posible existente en inglés y español sobre las arcillas sensitivas o “quick clays”.
2. Sintetizar toda la información conocida para identificar las condiciones geológicas adecuadas para la formación de estas arcillas.
3. Análisis de los mapas ofrecidos por el Servicio Geológico Sueco, Geokartan, para localizar áreas potenciales de poseer arcillas sensitivas y búsqueda de mapas que desarrollen las dimensiones del glaciar de Fenoscandia hace 10 mil años.
4. Comparación de los resultados con estudios anteriores.

Los principales recursos se han obtenido buscando artículos y documentos a través de google académico, que redirigía a páginas de la biblioteca de la Universidad de Gotemburgo desde las cuales se pudo acceder a la mayoría de libros referenciados en este trabajo. También se emplearon páginas de búsqueda de artículos y documentos científicos como es el caso de ScienceDirect, que fue el más utilizado. Para la obtención de la información se ha dado prioridad a aquellos documentos y trabajos realizados por institutos geológicos de Suecia.

Ya que la mayoría de estudios e información es en inglés, las palabras clave que se usaron fueron en el mismo idioma, siendo estas las siguientes: “Quick clays” o arcillas sensitivas; “clays” o arcillas; “landslides” o movimientos de laderas; “deglatiation” o desglaciación; “clay minerals” o minerales de arcilla; “detection” o detección; y “Göteborg”.

Criterios de inclusión y exclusión.

Se han utilizado como criterios de inclusión:

- Todos aquellos estudios y tesis que incluían información sobre las arcillas sensitivas y han sido desarrollados o respaldados por una universidad, preferentemente de Suecia.
- Estudios sobre arcillas sensitivas en el suroeste sueco.
- Estudios sobre arcillas sensitivas a escala global en los últimos 10 años.
- Documentos y servicios online para el análisis geológico de la zona a estudiar mediante el uso de mapas.

Se han excluido aquellos artículos que:

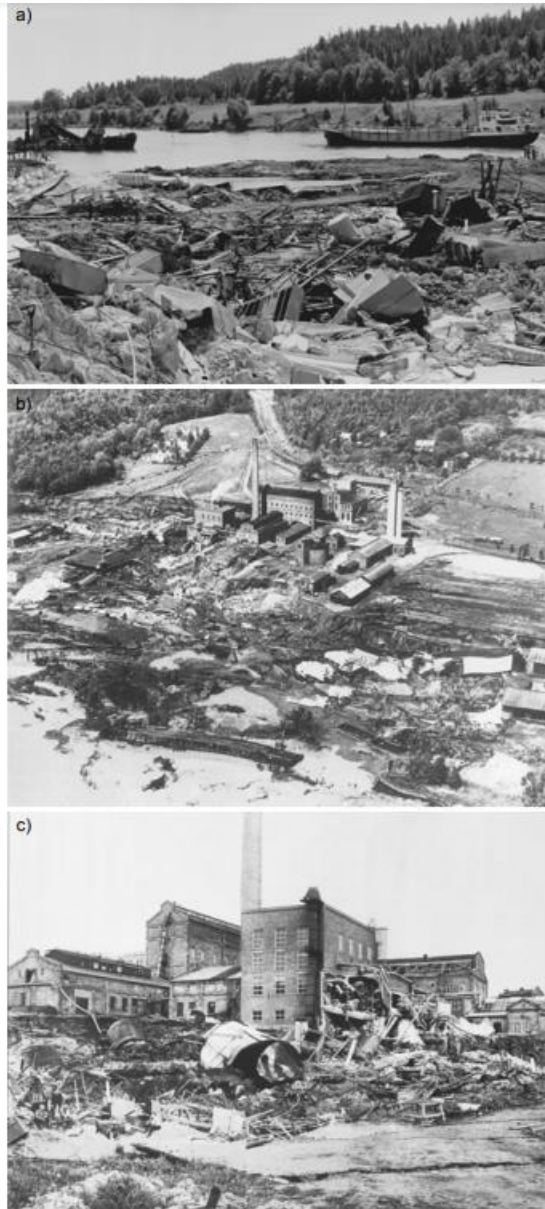
- No formaban parte de un estudio científico o universitario y no presentaban una bibliografía.
- Aquellos artículos que contenían menos de 500 palabras.
- Artículos que resumían otro documento más extenso.
- Estudios prácticos sobre arcillas sensitivas relacionados con la ingeniería que se enfocaban en cálculos matemáticos.

#### **4. RESULTADOS**

Tras haber recopilado toda la información bibliográfica suficiente para llevar a cabo el estudio se procede a analizar conjuntamente todos los puntos y apartados anteriormente desarrollados:

La investigación sobre las arcillas sensitivas es muy compleja ya que, aún, no tiene suficientes estudios. Esto se debe principalmente a que son específicas de unas pocas regiones de la Tierra y se comenzaron a estudiar en profundidad hace relativamente pocos años. Además, aquellos autores que documentaron sus conclusiones hace más de 50 años no conocían aún muy bien la razón de porque estas arcillas se comportaban espontáneamente como un fluido, especialmente con las depositadas en ambientes marinos, pues la concentración de sal no parecía estar relacionada.

El río Göta, en torno al cual se desarrolla la ciudad de Gotemburgo, es un río propenso a sufrir deslizamientos de ladera. Cuando se comenzaron a realizar estudios exhaustivos sobre las arcillas sensitivas, el instituto geotécnico sueco, procedió a tomar muestras y analizar dos grandes deslizamientos que se desarrollaron en este río, en 1950 y 1957. Sin embargo, se concluyó que no había relación entre el contenido de sal en las arcillas y los deslizamientos producidos en suelos con este material ya que, muchas de estas arcillas habían perdido las sales en procesos de lixiviación. (Söderblom 1974). No fue hasta años después cuando se confirmó que la lixiviación era el principal causante de la inestabilidad, siendo Rosenqvist (1946, 1953, 1966), quien con sus estudios demostró que la eliminación de minerales de sal de los sedimentos arcillosos depositados en un ambiente marino en Noruega, era esencial para el aumento inminente de la sensibilidad y posterior colapso y comportamiento fluido de las arcillas (Torrance, 2012).



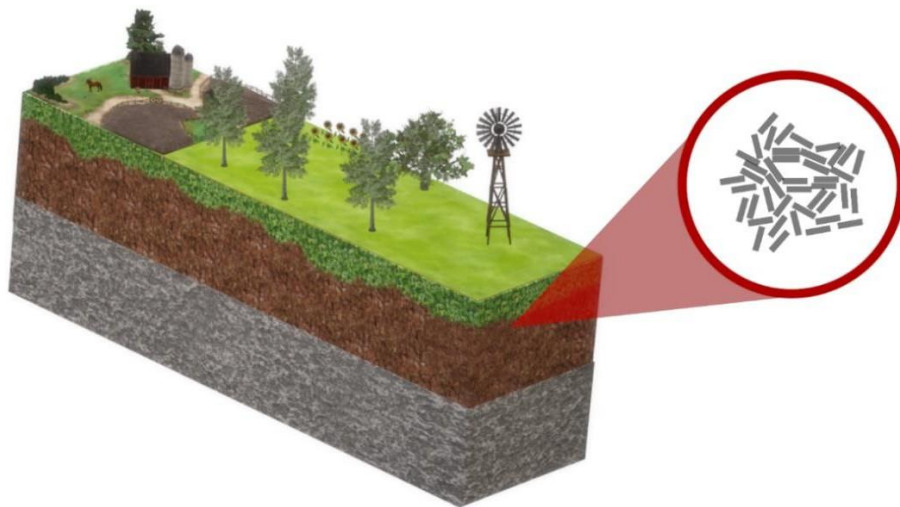
**Figura 2.** Diferentes puntos de vista del movimiento de ladera que afecto a una fábrica de sulfito cerca del río Göta, en Lilla Edet (junio 1957). Fotos: Edet Group's archive. (Salas Romero, 2019)

En los últimos años se están llevando a cabo más estudios para la detección de las arcillas sensitivas, como los realizados por Löfroth, et al., 2012, en varias zonas del río Göta proponiendo nuevos métodos para el análisis *in situ*. Otro ejemplo son los estudios realizados por Söderblom (1966), quien para comprender como las arcillas sensitivas se comportan al fluidizarse, sugiere la inyección en suelos arcillosos de agentes dispersantes, entre los que sugiere el hierro trivalente, para así poder estudiar el esperado movimiento de laderas propiciado por las arcillas.

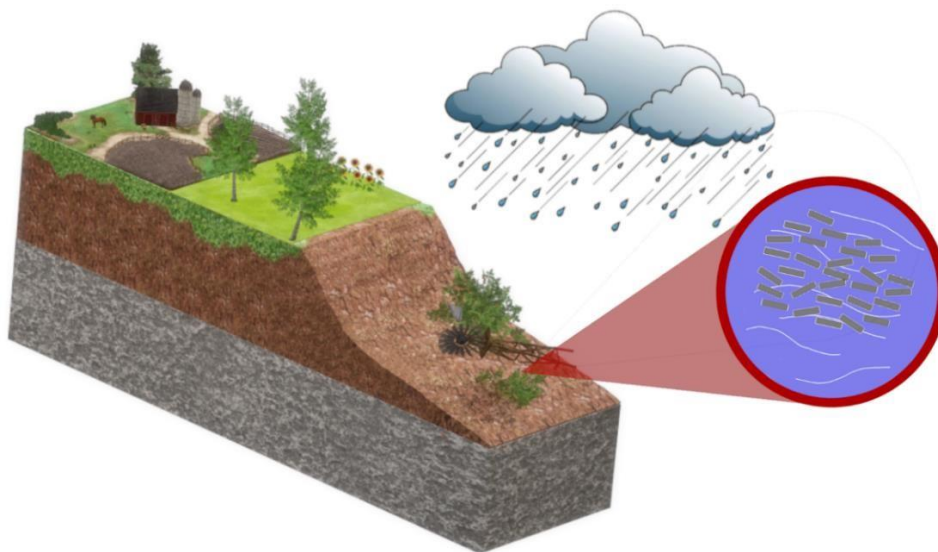
Las arcillas sensitivas no son comunes ya que, requieren de muchos factores específicos para su formación. Sin embargo, localizar este tipo de arcillas puede ser de gran importancia para evitar una catástrofe producida por los deslizamientos de tierras que están asociados a ellas. Pero esto no es tarea fácil. Los estudios realizados por Penner (1965), Talme et al.

(1966), Talme (1968) y Soderblom (1969) afirman que una misma zona a estudiar se pueden encontrar sedimentos de arcillas sensitivas y de arcillas normales (Sensitividad = 10-20) con contenidos de sal muy similares y a una distancia relativamente corta. Tanto en arcillas depositadas en ambientes marinos como no marinos. Por lo que incluso en una misma zona en la que se ha realizado un estudio puede haber arcillas sensitivas y no sensitivas a la vez.

Bernander, 1983, describe en su estudio las fases que sigue un deslizamiento de tierras provocado por estas arcillas haciendo notar que, la mayoría de veces que se ha producido este fenómeno a gran escala, se habían producido lluvias torrenciales anteriormente. Una reducción en la concentración de sal de la estructura de la arcilla, producida por la lixiviación, provocará que la arcilla adquiera alta sensibilidades y, por ende, una resistencia al corte mucho menor.



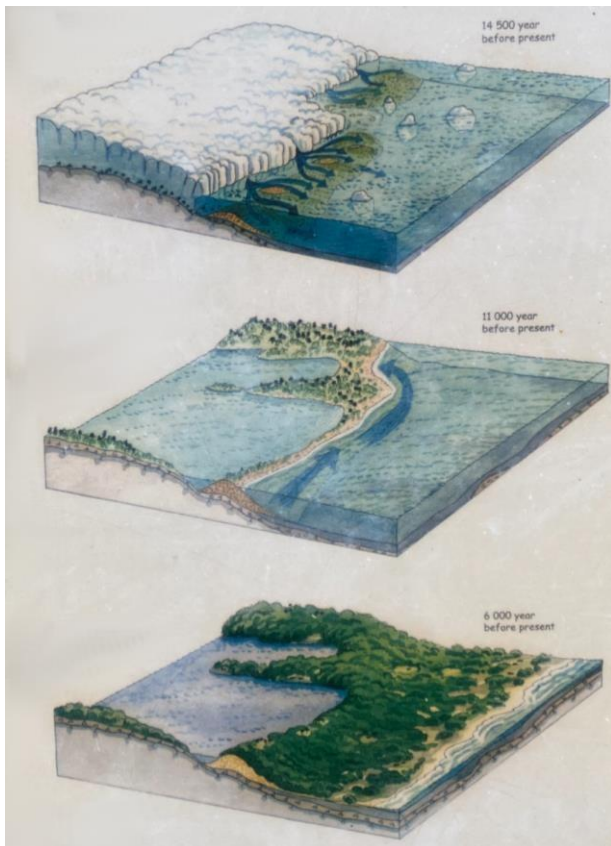
**Figura 3:** Arcillas de origen glaciomarino con sal entre los minerales (Elaboración propia, desarrollado con Paint 3D).



**Figura 4:** Reestructuración de los minerales de arcilla debido a la lixiviación producida por la lluvia y reducción de su resistencia, ocasionando un deslizamiento de tierras (Elaboración propia, desarrollado con Paint 3D).

Para prever su localización será necesario el uso de mapas que indiquen el tipo de suelo y materiales por región. Pero, además, hay que observar el pasado de la región, siendo necesario estudiar mapas con la localización y dimensiones del glaciar de Fenoscandia para conocer en qué zonas depositaba este los sedimentos y que magnitud tenía en cada momento durante su desglaciación en la zona a estudiar. La razón de esto es para poder analizar de qué forma Fenoscandia se elevó sobre el mar una vez que el glaciar desapareció, dejando todo tipo de sedimentos glaciomarininos en los márgenes del mismo durante las diferentes etapas de deshielo que sufrió y que posteriormente quedarían sobre la superficie.

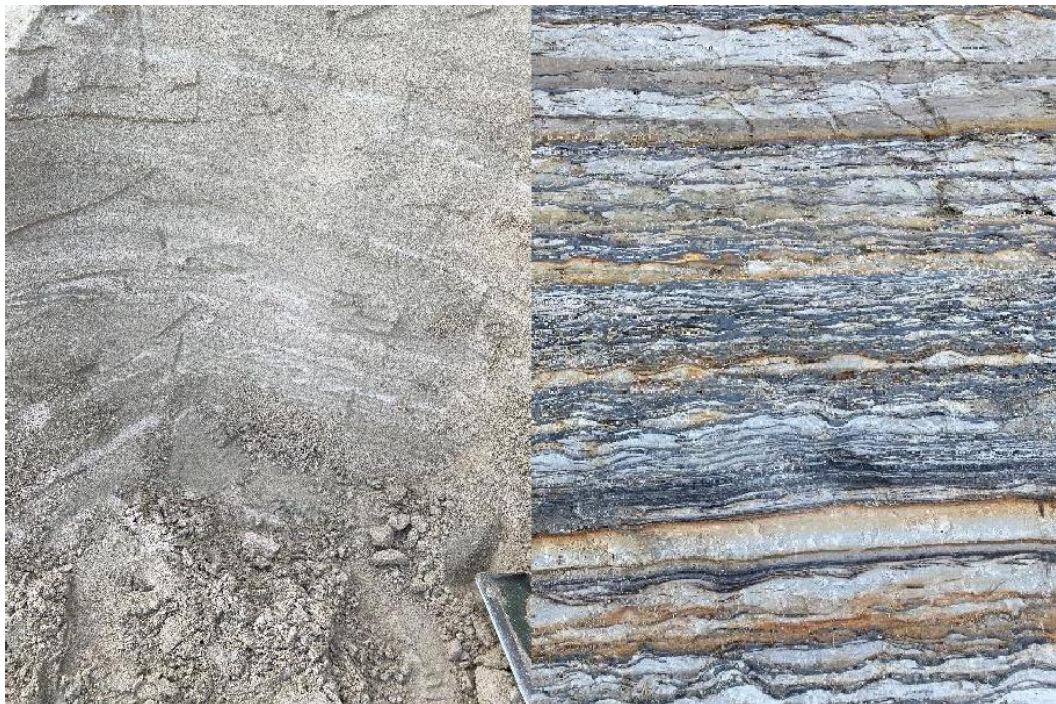
En Gotemburgo hay una gran morrena terminal que abarca desde la ciudad de Gotemburgo hasta Fjärås bräcka, donde se haya una importante acumulación de materiales depositados por el glaciar (Berglund, 1978). Esta morrena es de gran importancia porque representa, tal y como se ve en la *Figura 5*, que esa zona fue un límite del glaciar durante muchos años, en la que se depositaron gran cantidad de sedimentos glaciares. Además, una característica de gran relevancia que posee esta morrena es que presenta una estratificación gradada inversa, es decir, los granos más gruesos se encuentran depositados sobre los más finos. Esto demuestra que los sedimentos del glaciar fueron depositados formando una montaña y que cuando la península se levantó sobre nivel del mar y Fjärås quedó a la altura de la orilla, esta morrena hizo de barrera, la cual fue erosionada por las olas que depositaban los sedimentos al otro lado del muro de materiales, comenzando desde arriba, es decir, donde estaban los materiales finos, que serían los primeros en ser depositados en la base de la nueva morrena.



**Figura 5:** Proceso de formación de la morrena de Fjärås Bräcka (Ilustrador: Nils Forshed, 2008)

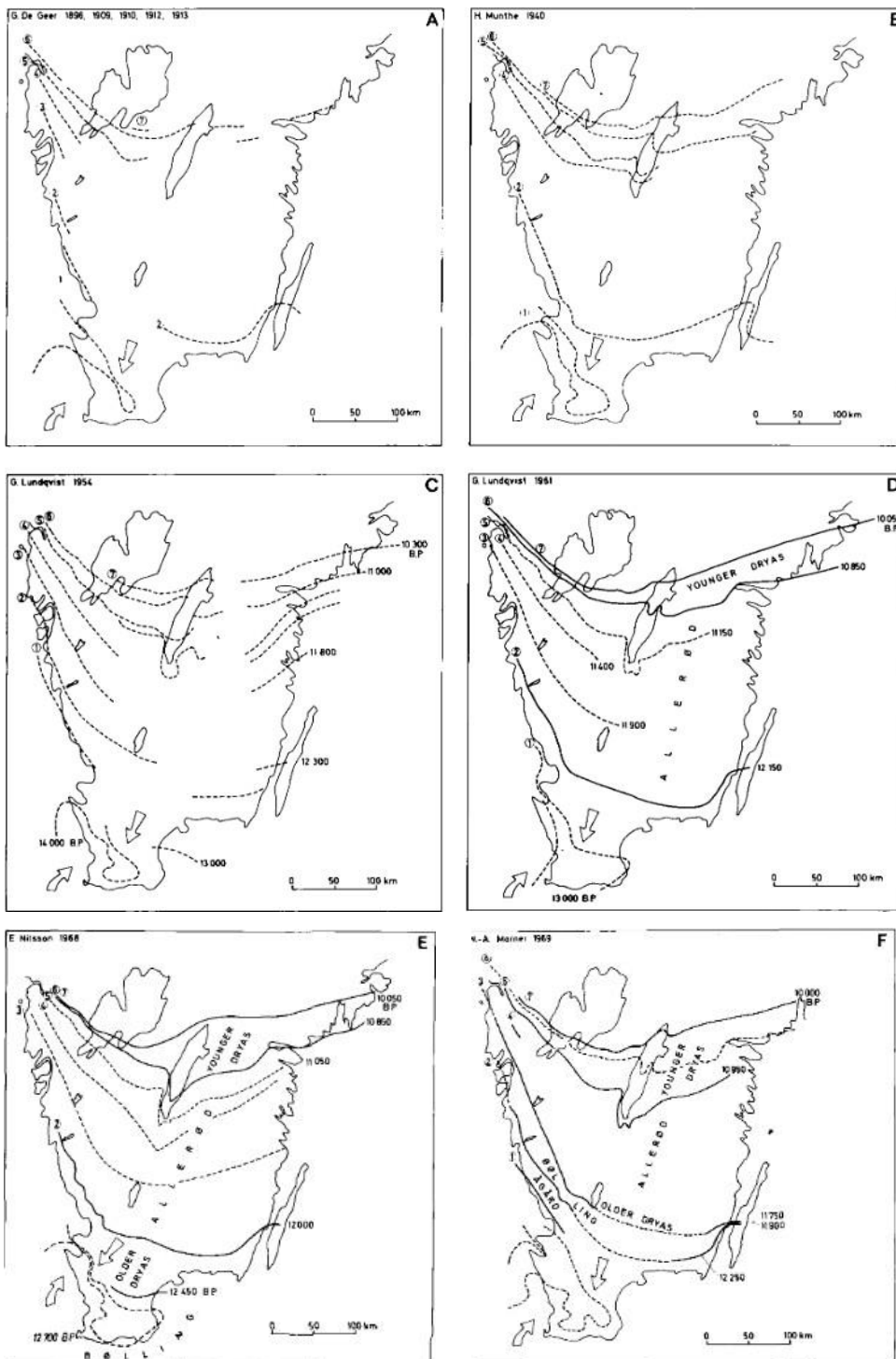
Cabe destacar que, el ambiente en el que se han desarrollado estas arcillas es de gran importancia, pues según si han sido depositadas en ambientes marinos o de agua dulce, tendrán unas propiedades u otras.

Las arcillas glaciales depositadas en ambientes de agua dulce, lo hicieron de forma estacionaria, formando bandas en los estratos que alternan capas de arcilla y capas de materiales de grano más grueso como es el caso de la arena. Estas alternancias en la deposición según la estación del año se conocen como varvas (derivada del sueco *varv*). Aquellas arcillas sensitivas depositadas en agua dulce suelen estar sedimentadas bajo estratos de turba, desde la cual obtienen los iones necesarios para incorporar a su estructura (Söderblom, 1960).



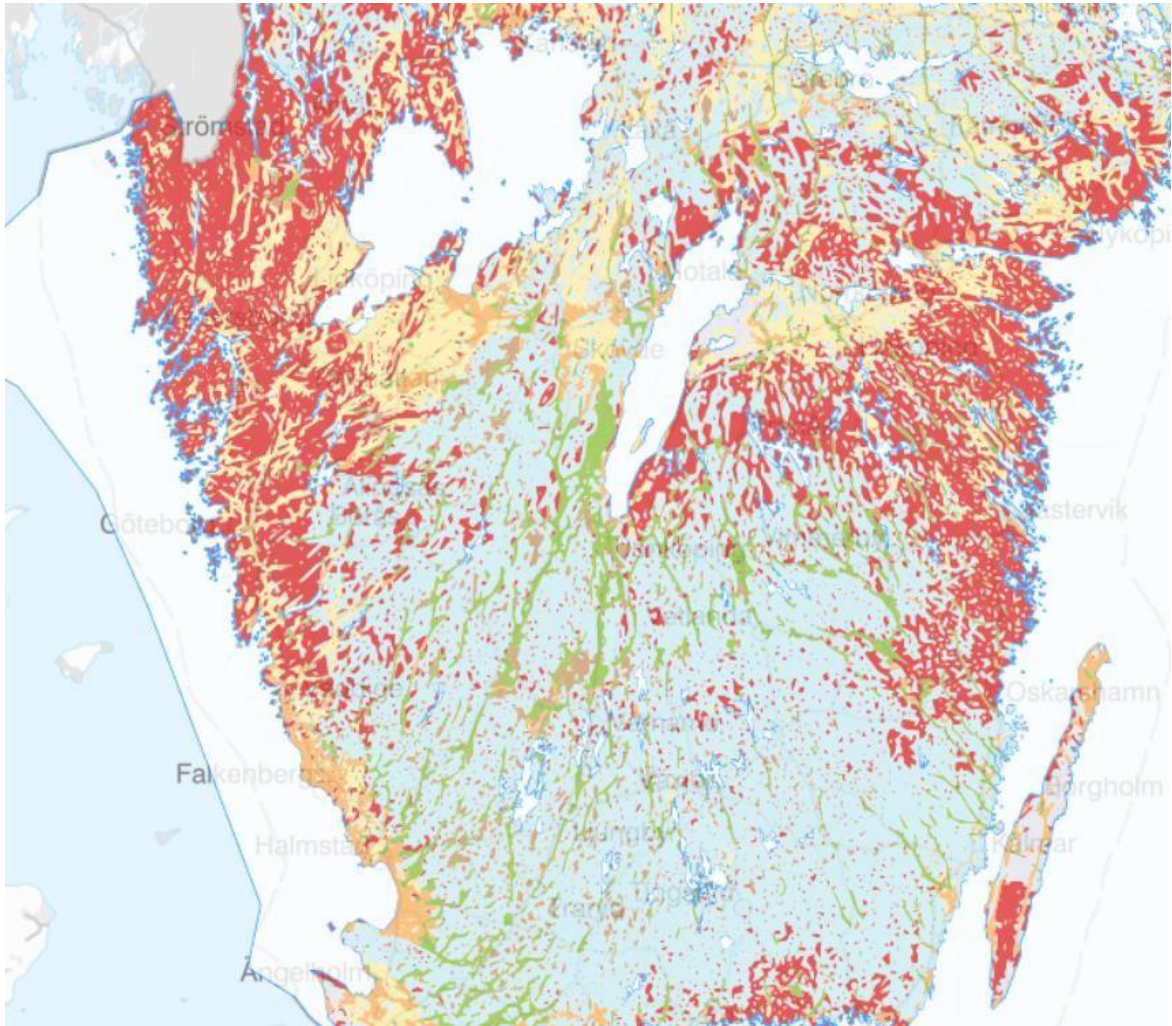
**Figura 6:** De izquierda a derecha: varvas en Fjärås Bräcka; ejemplo de varvas en Bornholm (Elaboración propia).

En la figura 7 se puede apreciar el retroceso del glaciar con el paso de los años, representando las líneas los límites del glaciar por años. Comparando esta figura con la figura 8 se puede entender mejor la abundancia de los sedimentos de morrena.



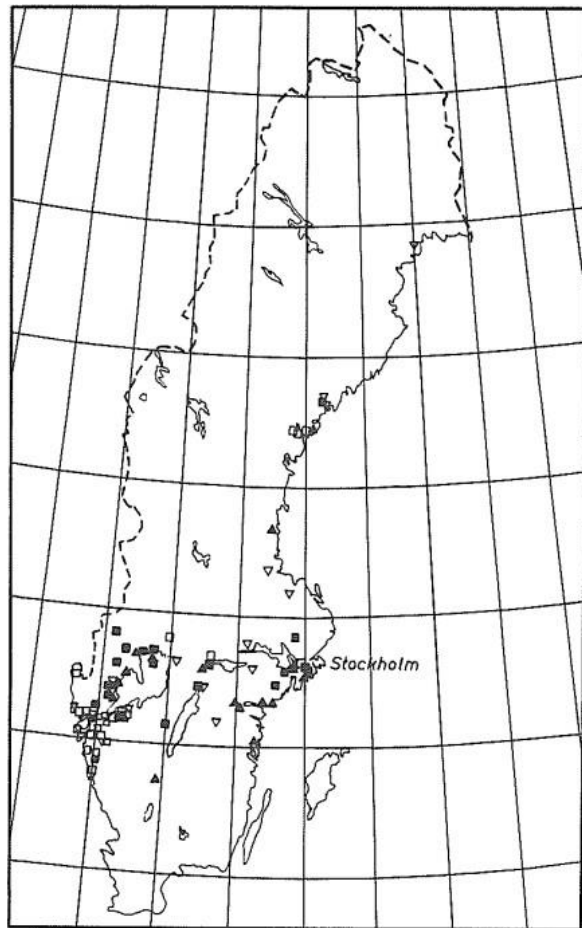
**Figura 7:** Límites del glaciar según G. Lundqvist (1954, 1961); H. Munthe (1940); G. De Geer (1896, 1909, 1910, 1912, 1913); E. Nilsson (1968); Morner (1969).





**Figura 8:** Representación de los materiales geológicos predominantes en el Suroeste sueco, donde el rojo es roca madre; el amarillo, arcilla; el azul sedimentos de morrena; y el verde sedimentos glaciares en ríos (Imagen extraída de Geokartan, junio 2022).

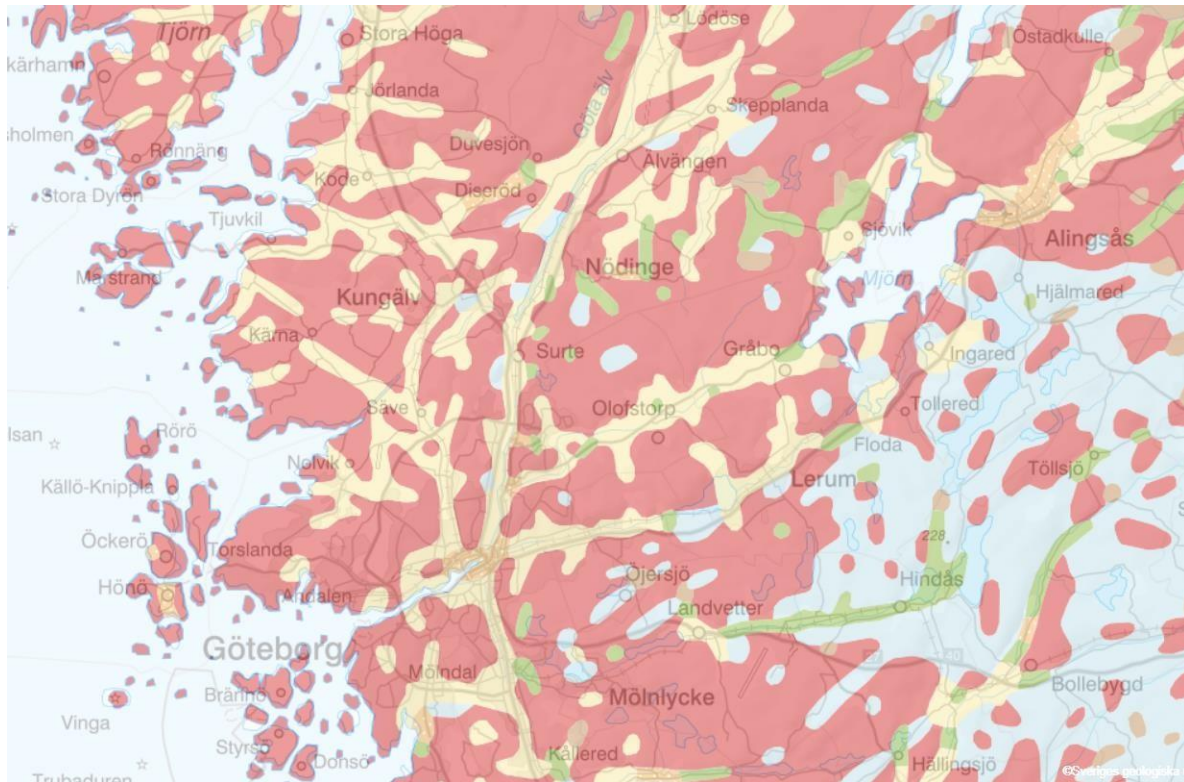
Comparando la figura 8 y la figura 9 se puede apreciar como verdaderamente las arcillas sensitivas se dan donde hay un abundante depósito glacial de este material, pero como en los depósitos de morrenas apenas hay. Esto se debe a que, las morrenas, contienen materiales de diferentes tamaños de granos, lo que hace otorga al terreno una mayor consistencia estructural y evita que la lixiviación de las arcillas pueda desencadenar en un movimiento de laderas de grandes magnitudes.



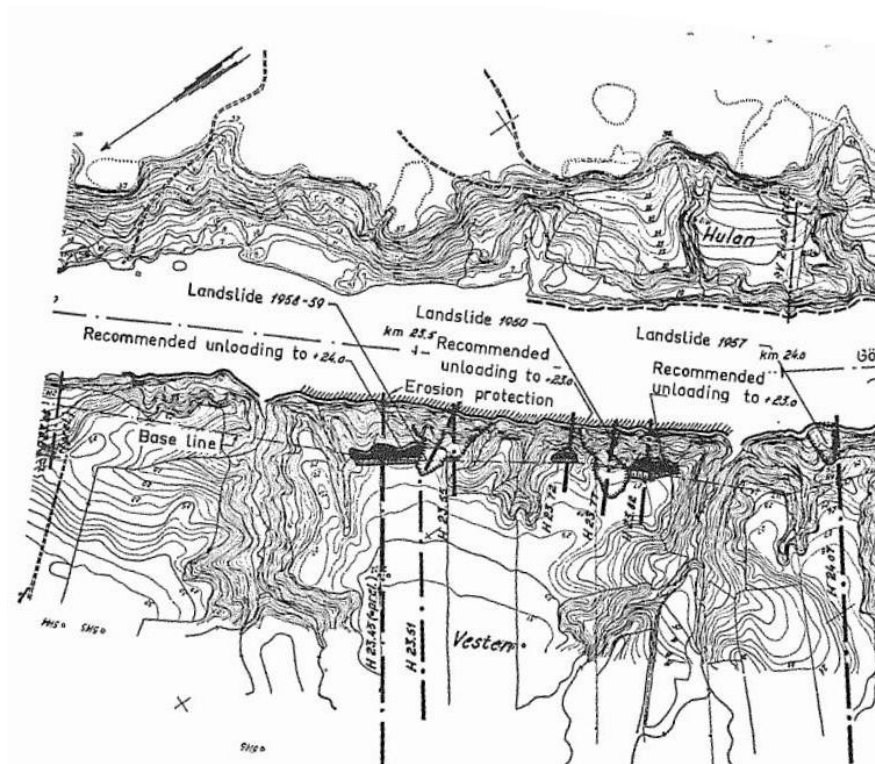
Map showing the occurrence of different types of quick clays in Sweden  
 ▽ non-varved quick clays in connection with peat or other organic materials  
 ▲ varved quick clays in connection with peat or other organic materials  
 □ other non-varved quick clays  
 ■ other varved quick clays

**Figura 9:** Mapa localizando los diferentes tipos de quick clays localizados en Suecia (Söderblom 1974).

Atendiendo a la figura 10 se puede afirmar que la geología de Gotemburgo está definida principalmente por abundantes afloraciones de la roca madre y grandes sedimentos de arcilla de hasta 40 metros de profundidad (Attari, 2018). La mayoría de estas arcillas son de origen glaciomarino y post-glacial (Wood, 2022). Además, es de especial interés el cauce del río Göta, en el que se puede apreciar cómo está arropado por sedimentos arcillosos a lo largo del mismo, lo que explica la abundancia de arcillas sensitivas en él y los numerosos movimientos de laderas que se producen con frecuencia como se observa en la Figura 11.



**Figura 10:** Representación de los materiales geológicos presentes en Gotemburgo, donde el rojo representa la roca madre y el amarillo la arcilla (Imagen extraída de Geokartan, junio 2022).



**Figura 11.** Mapa del río Göta con una erosión activa y movimientos de ladera que ocurren cada cierto tiempo en depósitos de arcillas sensitivas. Muestra zonas donde se proponen obras de protección del cauce (Osterman, 1963).

## 5. CONCLUSIONES

Analizando los resultados y la información obtenida se puede concluir que, pese a que es muy complicado conocer la posición exacta de las arcillas sensitivas, sí que se puede conocer que áreas son más propensas analizando los materiales predominantes en cada zona. En el caso de Gotemburgo, las partes arcillosas requerirán de un estudio y una valoración sobre el riesgo de edificación en ese suelo ya que, aunque en un principio parezcan no ser arcillas sensitivas, es importante conocer que, como afirman los estudios de Andersson-Sköld, 2005, todas aquellas arcillas que fueron depositadas en ambientes marinos son susceptibles de llegar a convertirse en arcillas sensitivas en cualquier momento debido a la lixiviación, especialmente las zonas arcillosas cercanas al río Göta, donde la erosión es mayor y el constante flujo de agua dulce ayuda en el proceso de retirada de sales.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abuhajar, O., El Naggari, M. H., & Newson, T. (2010). Review of available methods for evaluation of soil sensitivity for seismic design. In *Proceedings of the International Conference Recent Advances in Geotechnical Engineering, Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, San Diego, CA, USA (pp. 24-29). [https://www.researchgate.net/publication/282651066\\_Review\\_Of\\_Available\\_Methods\\_For\\_Evaluation\\_Of\\_Soil\\_Sensitivity\\_For\\_Seismic\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/282651066_Review_Of_Available_Methods_For_Evaluation_Of_Soil_Sensitivity_For_Seismic_Design)
2. Andersson-Sköld, Y., Rankka, K., Lind, B., Odén, K., Torrance, J. K., Stevens, R. L., Dahlin, T., & Leroux, V. (2005). Quick clay – an investigation in South West Sweden. Paper presented at Procs. 11th International Conference and Field Trip on Landslides, Norway. <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/6232704/4934643.pdf>
3. Attari, Y., Doherty, P., Quigley, P., & Lusack, N. (2018). Predicting Pile Driving Induced Movements in Gothenburg Soft Clay. Conference: Civil Engineering Research in Ireland 2018 (CERI2018). Dublin, Ireland [https://www.researchgate.net/publication/328249261\\_Predicting\\_Pile\\_Driving\\_Induced\\_Movements\\_in\\_Gothenburg\\_Soft\\_Clay](https://www.researchgate.net/publication/328249261_Predicting_Pile_Driving_Induced_Movements_in_Gothenburg_Soft_Clay)
4. Berglund, B. E. (1979). The deglaciation of southern Sweden 13,500-10,000 BP. *Boreas*, 8(2), 89-117. Oslo. ISSN 0300-9483 <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1979.tb00789.x>
5. Bernander, S. (1983). Active earth pressure build-up: a trigger mechanism in large landslides in sensitive (quick) clays. In *Symposium on Slopes on Soft Clays: 08/03/1982-10/03/1982* (pp. 55-67). Statens geotekniska institut (SGI). <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1003886/FULLTEXT01.pdf>
6. Chávez García, R. (2022). *Evaluación y caracterización físico-química de minerales arcillosos de litologías del noreste de México para la eliminación de iones metálicos* (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, México).
7. Chumpitaz Hernández, G. (2015). Monografía: Compresión no Confinada. Universidad Peruana de los Andes, Lima, Perú. <https://es.slideshare.net/tavooo23/compresion-no-confinada>

8. C. W. Clemente, V. P. Faro & M. P. H. Moncada. (2019). Determination of undrained shear strength by the Fall Cone Method – Analysis, concept and guidelines. [https://www.issmge.org/uploads/publications/51/75/0984-ecsmge-2019\\_Clemente.pdf](https://www.issmge.org/uploads/publications/51/75/0984-ecsmge-2019_Clemente.pdf)
9. Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3 Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247). <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
10. Deméneghi, A. (2010). Predicción de deformaciones a largo plazo en arcillas sensitivas. *Memorias XXV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*, 353-361. [http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Pa\\_per896.pdf](http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Pa_per896.pdf)
11. Eduardo Besoain, (1985). Mineralogía de Arcillas de Suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica. [https://books.google.se/books?hl=es&lr=&id=pfL7oUpzl1QC&oi=fnd&pg=PA156&dq=arcillas+minerales&ots=FkXtzN7JLt&sig=DyKFqIBqY7wNE5Z7T6oz\\_bvXGEk&redir\\_esc=y#v=onepage&q=arcillas%20minerales&f=false](https://books.google.se/books?hl=es&lr=&id=pfL7oUpzl1QC&oi=fnd&pg=PA156&dq=arcillas+minerales&ots=FkXtzN7JLt&sig=DyKFqIBqY7wNE5Z7T6oz_bvXGEk&redir_esc=y#v=onepage&q=arcillas%20minerales&f=false)
12. Emilia García Romero & Mercedes Suárez Barrios, 2002. Las Arcillas: Propiedades y Usos. Universidad Complutense, Madrid.
13. Giles, D. P. (2020). Chapter 7 - Quick clay behaviour in sensitive Quaternary marine clays—a UK perspective. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 29(1), 205-221. <https://doi.org/10.1144/EGSP29.7>
14. Herrera Abello, D.P. & Niño Torres, L.M. (2015). Estimación de la Correlación Adecuada Para la Resistencia no Drenada de Suelos de Piedemonte de los Cerros Orientales a Partir del Ensayo de Veleta (VST). Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2435/1/ESTIMACI%c3%93N%20DE%20LA%20CORRELACI%c3%93N%20ADECUADA%20PARA%20LA%20RESISTENCIA%20NO%20DRENADA%20DE%20SUELOS%20DE%20PIEDEMONT%20DE%20.pdf>
15. Karlsson, R., & Hansbo, S. (1989). Soil Classification and Identification: Byggforskningensrådet. Swedish Geotechnical Society. <https://docplayer.net/20623861-Soil-classification-and-identification-rudolf-karlsson-sven-hansbo-in-cooperation-with-the-laboratory-committee-of-the-swedish-geotechnical-society.html>
16. Löfroth, H., Suer, P., Schälin, D., Dahlin, T., & Leroux, V. (2013). Mapping of quick clay using sounding methods and resistivity in the Göta River valley. In *Geotechnical and Geophysical Site Characterization: Proceedings of the 4th International Conference on Site Characterization ISC-4* (Vol. 1, pp. 1001-1008). Taylor & Francis Books Ltd. [https://www.researchgate.net/publication/239794159\\_Mapping\\_of\\_quick\\_clay\\_using\\_sounding\\_methods\\_and\\_resistivity\\_in\\_the\\_Gota\\_River\\_valley](https://www.researchgate.net/publication/239794159_Mapping_of_quick_clay_using_sounding_methods_and_resistivity_in_the_Gota_River_valley)
17. N. E. SIMONS, M.Sc.(Eng.)(Natal), B.A.(Cantab.) (Visitor) (1959) GEOTECHNICAL FEATURES OF NORWEGIAN LATE GLACIAL MARINE CLAYS [https://hdl.handle.net/10520/AJA10212019\\_20132](https://hdl.handle.net/10520/AJA10212019_20132)

18. Osterman, J. (1963). Studies on the properties and formation of quick clays. *Clays and clay minerals*, 12(1), 87-108. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300001/FULLTEXT01.pdf>
19. Persson, M. (2014). Predicting spatial and stratigraphic quick-clay distribution in SW Sweden. Tesis doctoral. Universidad de Gotemburgo, Gotemburgo, Suecia.
20. Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hulten, C., Larsson, R., Leroux, V., & Dahlin, T. (2004). Quick clay in Sweden, Report 65. *Statens Geotekniska Institut, Linköping*. <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/rapporter/pdf/sqi-r65.pdf>
21. Salas Romero, S. (2019). Multidisciplinary Near-Surface Investigation of a Quick-Clay Landslide Prone Area in Southwest Sweden. Tesis doctoral. Uppsala Universitet, Uppsala, Suecia. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1287343/FULLTEXT01.pdf>
22. Söderblom, R. (1960). Aspects on Some Problems of Geotechnical Chemistry: Part II. *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, 82(3), 367-381.
23. Söderblom, R. (1966). Chemical aspects of quick-clay formation. *Engineering Geology*, 1(6), 415-431. Swedish Geotechnical Institute, Stockholm Sweden
24. Soderblom, R. (1974). A New Approach to the Classification of Quick Clays. Swedish Geotechnical Institute. <https://trid.trb.org/view/26131>
25. Söderblom, R. (1974). Organic matter in Swedish clays and its importance for quick clay formation. Stockholm: Statens geotekniska institut, 1974. , p. 89 <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300154/FULLTEXT01.pdf>
26. Salas Romero, S., Malehmir, A., Snowball, I., Lougheed, B. C., & Hellqvist, M. (2016). Identifying landslide preconditions in Swedish quick clays insights from integration of surface geophysical, core sample and downhole property measurements. *Landslides*, 13, 905-923. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0633-y>
27. Stroeven, A.P., et al. (2016). Deglaciation of Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews*, 147, 91–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.09.016>.
28. Tara Wood & Minna Karstunen (2022) Modelling the creep of deep foundations in soft Gothenburg clays, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26:7, 2581-2599, <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1344146>
29. Torrance, J. K. (2012). *Landslides in quick clay. Landslides: types, mechanisms and modeling.* Cambridge University Press, Cambridge, 83-94. [https://books.google.se/books?hl=es&lr=&id=VtN7BwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA83&dq=j+kenneth+torrance+landslides+in+quick+clay&ots=sBHVXYM6iS&sig=0jiVS4yyp7LbsFie9PX61pPIA5U&redir\\_esc=y#v=onepage&q=j%20kenneth%20torrance%20landslides%20in%20quick%20clay&f=false](https://books.google.se/books?hl=es&lr=&id=VtN7BwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA83&dq=j+kenneth+torrance+landslides+in+quick+clay&ots=sBHVXYM6iS&sig=0jiVS4yyp7LbsFie9PX61pPIA5U&redir_esc=y#v=onepage&q=j%20kenneth%20torrance%20landslides%20in%20quick%20clay&f=false)
30. Velde, B. (1992). The clay perspective. In: *Introduction to Clay Minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance* (Vol. 198). Editorial Chapman & Hall, London.